

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт космических и информационных технологий
Базовая кафедра геоинформационных систем

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

_____ В.И. Харук
« _____ » _____ 2018 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Геоинформационное моделирование речной сети бассейнов реки Енисей

09.04.01 Информатика и вычислительная техника

09.04.01.07 Дистанционное зондирование и ГИС-технологии в мониторинге
природных и антропогенных экосистем

Научный руководитель	_____	_____	О.Э. Якубайлик
Выпускник	_____		Е.С. Турчанинова
Рецензент	_____	_____	А.А. Кадычников
Нормоконтролер	_____		Е.В. Федотова

Красноярск 2018

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Основные понятия водосборных бассейнов	7
1.1 Методы определения площади водосборных бассейнов.....	11
1.1.2 Определение площади водосборного бассейна с помощью кальки и миллиметровки	11
1.1.2 Способ палетки.....	12
1.1.3 Планиметрирование.....	12
1.1.4 Графический способ	13
1.2 Водохозяйственный участок реки Енисей	14
2 Цифровые модели рельефа	17
2.1 Цифровые модели рельефа для гидрологических расчетов	18
2.2 Радарная топографическая съемка SRTM.....	20
2.3 Радарная топографическая GMTED2010	21
2.4 Исходные данные используемые в работе	21
2.5 Геоинформационная система Quantum GIS	22
2.6 Программное обеспечение WhiteBox GAT	23
3 Построение бассейнов	24
3.1 Основная идея построения бассейнов задействованная в работе	24
3.2 Особенности работы с растровыми данными на северной части реки Енисей.....	25
3.2 Технологии построения бассейнов использованные в работе ...	28
3.3 Этапы построения водосборных бассейнов	29
3.3.1 Подготовка к работе исходных растровых данных.....	29

3.3.2 Автоматическое построение водосборных бассейнов с помощью алгоритмов построения бассейнов в Программном Обеспечении White Box GAT	32
3.3.3 Формирование и корректировка бассейнов в ПО Quantum GIS	36
3.3.4 Основной результат построения бассейнов	38
4 Анализ дальнейшей работы с полученными данными	41
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	45
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	47

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность данного исследования связана с созданием современных гидрологических моделей, учитывающих развитие информационных технологий, отвечающих особенностям данных дистанционного зондирования и расчетных данных моделей климата и гидродинамических моделей атмосферы. Работа является частью общего направления интеграции научных разработок и технологий для создания структурной основы и средств параметрического наполнения гидрологических моделей универсального применения.

Математическое моделирование процессов формирования речного стока составляет базовый исследовательский и инженерный инструментарий современной гидрологии. Несмотря на ряд несомненных успехов моделирования и довольно широкое внедрение моделей в практику, остается неразрешенным ряд задач, указывающих на принципиальные трудности традиционных подходов к проблеме. Наиболее важными среди таких задач являются: оценка режима экстремальных гидрологических событий, в первую очередь паводков; использование гидрологических моделей на неизученных бассейнах; перспективный прогноз гидрологического режима при ожидаемых изменениях климата и ландшафтов [1].

Дальнейшее развитие гидрологических моделей, адекватно отражающих сильную нелинейность экстремальной динамики речных систем, особенности их адаптации в условиях нестационарного климата и сложность пространственного строения, требует взаимоувязанного расширения теоретической и информационной базы. Необходимо привлечение нового массива данных, достаточно доступных и надежных, включающих информацию о неизученных бассейнах и редких гидрологических событиях, допускающих органичное развитие теории моделирования – данных о структуре речных систем [1].

Целью данной работы является формирование водосборных бассейнов рек второго и третьего порядка бассейна реки Енисей.

В рамках данной работы выделим четыре основных задачи, решаемые в работе:

- подготовка растровых данных по рельефу: склеивание растровых слоев, нарезка, конвертирование в метрическую проекцию для оптимизации дальнейшей работы в специализированном ПО White Box Gat. На данном этапе выполняется предварительная обработка данных по рельефу;

- формирование бассейнов в специализированном ПО White Box GAT, используя алгоритмы Breach Depression Fast (высчитывает слой аккумулятивного стока по исходному растру на нужную территорию), Extract Stream (высчитывает минимальную площадь для бассейна по заданным значениям масштаба), Sub-basins (Строит конечный вариант слоя с построенными бассейнами рек)

- постобработка преобразования полученных данных. Окончательная обработка результатов вычислений. Преобразование данных из растра в вектор. В процессе преобразования возникают ошибки с пикселями исходного растра, которые не являются бассейнами и на уровне векторных данных для конечного результата на данном этапе необходимо их убрать. Также на этом этапе производится объединение бассейнов для нужного уровня детализации данных. Вся работа проходит в ПО QGIS;

- Анализ дальнейшего развития информационного контента данных;

Объектами исследования являются разнопорядковые речные системы, расположенные в пределах бассейна Среднемасштабная ЦМР на всю исследуемую территорию создана на основе данных SRTM (пространственное разрешение 1 угл. с/ ~ 30 м, 3 угл. с/ ~ 90 м; пространственное покрытие 60° с. ш.–56° ю. ш. и GMTED2010 (пространственное разрешение 7,5 угл. с/ ~ 250 м, 15 угл. с / ~ 500 м, 30 угл. с / ~ 1000 м; пространственное покрытие 84° с. ш.–

56° ю. ш.). Также был использован векторный слой Level1 с основными бассейнами Енисея.

1 Основные понятия водосборных бассейнов

Примерно три четверти земного шара покрыто водной оболочкой — Мировым океаном [2].

С поверхности морей и океанов благодаря солнечной радиации испаряется огромное количество воды (505 тыс. км³ в год). Поднимаясь в верхние слои атмосферы, испарившаяся влага конденсируется и выпадает в виде дождя, снега или града. Однако на сушу переходит относительно небольшое количество влаги — около 8% всего испарения с морей и океанов. Это количество воды и является активным в общем круговороте воды. Вода в жидком или твердом состоянии, выпадающая из облаков или осаждающаяся из воздуха на поверхность земли и на предметы, называется осадками. Эти осадки, стекая с возвышенных мест в понижения рельефа, оказывают неблагоприятное воздействие на преграждающие им путь дорожные сооружения [2].

Воды, находящиеся на поверхности суши в виде различных водных объектов, называются поверхностными водами, а находящиеся под земной поверхностью — подземными водами. Изучением их занимаются науки гидрология и гидрогеология [2].

Основным понятием в гидрологии суши считается водный объект. Водные объекты подразделяются на водотоки и водоемы.

Водный объект, в котором вода движется в направлении уклона в углублении земной поверхности, называется водотоком. Различают постоянные водотоки (движение воды происходит в течение всего года или большей его части) и временные (движение воды происходит меньшую часть года или эпизодически) [3].

Водный объект в углублении суши, характеризующийся замедленным движением воды или полным его отсутствием, называется водоемом.

Расход является исходной величиной для таких гидрологических параметров, как скорость и глубина потока. Расход воды — объем воды, проходящий в данном сечении реки (трубы, моста или другого искусственного сооружения) в единицу времени, как правило, в дорожных гидрологических расчетах измеряется в кубических метрах в секунду ($\text{м}^3/\text{с}$) [4].

Значение гидрологических данных, необходимых для проектирования дорожных сооружений, принимают к расчету по результатам обработки многолетних рядов наблюдений (например, за расходом или уровнем реки или ручья). В случаях, когда на обследуемых водных объектах не велись гидрометрические измерения, данные получают по аналогии с ранее изученными водными объектами, находящимися в районе расположения проектируемой дороги [3].

Количество воды, поступающее в водный объект, зависит, в основном, от площади, с которой она собирается, получившей название "бассейн" [3].

Бассейном, или водосбором, называется площадь земной поверхности, находящаяся выше по течению от замыкающего створа этого бассейна (проектируемого искусственного сооружения), с которого возможен к нему сток по склонам, логам и долинам [2].

Бассейн в общем случае состоит из поверхностного и подземного водосборов. Поверхностный водосбор представляет собой участок поверхности, с которого поступают воды в водный объект, а подземный водосбор образуют толщи почвогрунтов. Как правило, подземный и поверхностный водосборы по площади не совпадают. Однако из-за больших затруднений в определении границы подземного водосбора обычно в расчетах размеры бассейна принимают в пределах только поверхностного водосбора и вследствие этого не делают различия между терминами "бассейн" и "водосбор" или объединяют их термином "водосборный бассейн" [2].

Гидрографические характеристики водосборных бассейнов определяются, как правило, по имеющимся топографическим материалам (картам, планам), а при их отсутствии — по данным полевых

рекогносцировочных обследований местности. В результате этого собираются следующие сведения, позволяющие учесть основные особенности стока:

- название и местоположение водосборных бассейнов по трассе дороги;
- площади водосборных бассейнов; - длины водотоков;
- отметки истока и у расчетного створа;
- общий характер рельефа бассейна (равнинный, холмистый и гористый);
- уклон лога;
- типы почв, видовой состав растительности и их распространение по направлению дороги и площади каждого водосбора;
- наличие и местоположение озер, болот, марей, бессточных впадин, пахотных земель, карстовых, мерзлотных и других явлений;
- наличие и местоположение прудов, водохранилищ, каналов, арыков, плотин, запруд, мостов и других искусственных сооружений [4].

Для определения площади водосборного бассейна и указанных выше характеристик устанавливают границы каждого из пересекаемых водосборных бассейнов. Границы бассейнов определяемые по горизонталям на картах и проводят в виде плавных линий [4].

Водоразделом называется линия, проходящая по наивысшим точкам данного рельефа местности, сток воды с которого происходит в смежные бассейны (рисунок 2). Стрелками показаны направления течения воды [2].

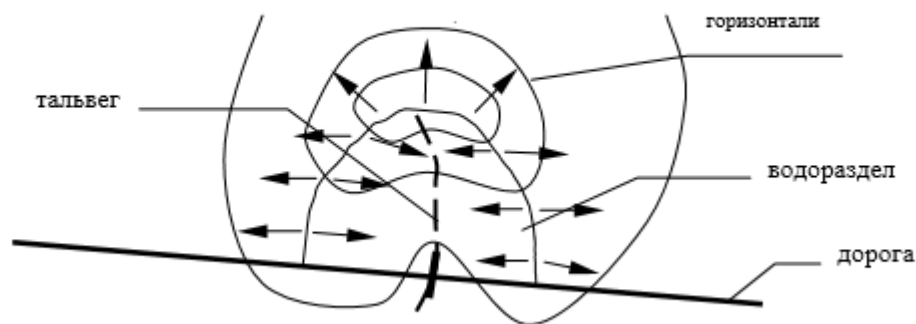


Рисунок 2—план водосборного бассейна

Площадь водосборного бассейна является его основной характеристикой. Измеряется она в квадратных километрах и определяется по картам или планам различного масштаба. При определении границ водосборных бассейнов площадью до 100 км следует пользоваться картами масштаба крупнее 1:1000000. При их отсутствии, а также при площадях бассейнов менее 0,25 км следует производить натурную съёмку. При выборе масштаба карт следует стремиться к тому, чтобы бассейн изображался площадями не менее 5 см² [3].

Проводимые по соседним водоразделам границы водосборного бассейна могут соединяться на склоне в одну наиболее высокую точку водосборного бассейна, либо выходить к так называемому верховому или главному водоразделу. Главный водораздел проводится в виде плавной линии по цепи возвышенностей, холмов или гор, отделяющих бассейн одного большого водного объекта (реки, озера, моря) от другого. Далее штриховой линией проводится в каждом водосборном бассейне тальвег (в переводе с немецкого — долинный путь), т.е. линия, соединяющая низшие точки рельефа местности (дно долины) в бассейне. Линия в промежутке между горизонталями может плавно изгибаться в соответствии с рельефом местности, но всегда проводится

перпендикулярно к месту пересечения горизонтали в наиболее удалённой по линии тальвега точке [3].

В случаях, когда направление лога, тальвега или границ водосборного бассейна трудно определить, необходимо принимать направление стока по линиям, перпендикулярным горизонталям [3].

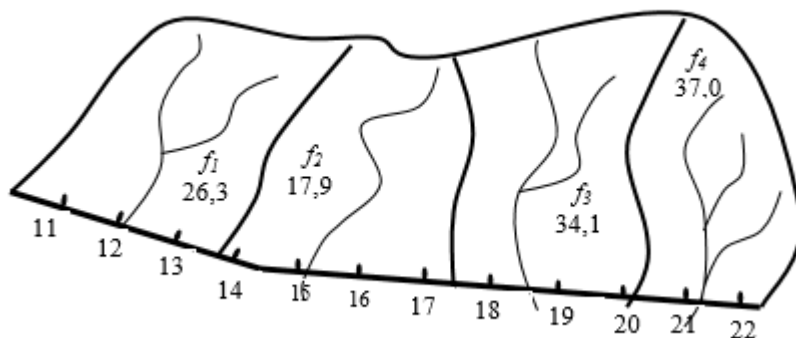


Рисунок 3 – сводный план водосборных бассейнов

Способ полевых обследований неясно выраженных водоразделов определяют в каждом конкретном случае, исходя из их стадии, сроков выполнения и объёмов изыскательских работ, наличия топографических материалов, характера местности и степени залесенности [3].

1.1 Методы определения площади водосборных бассейнов

1.1.2 Определение площади водосборного бассейна с помощью кальки и миллиметровки

Лист кальки накладывается на карту и обводятся границы водосборного бассейна. Полученный план водосборного бассейна (в масштабе карты) накладывается на лист миллиметровой бумаги. Отмечают и пересчитывают все целые квадратные сантиметры (N_1), которые поместились на плане. На оставшейся площади плана водосборного бассейна отмечают и

пересчитывают количество квадратиков размером $0,5 \times 0,5$ см (N_2), затем пересчитывают оставшиеся неполные квадратики размером $0,5 \times 0,5$ см (N_3). Площадь водосборного бассейна (км^2) определяется по формуле

$$F = N_1 \cdot q_1 + N_2 \cdot q_2 + \frac{1}{2} N_3 \cdot q_2, \quad (1)$$

где – q_1 (в масштабе карты) 1 см^2 ; q_2 – площадь (в масштабе карты) $0,25 \text{ см}^2$; N_1, N_2, N_3 – количество квадратов каждого размера [5].

1.1.2 Способ палетки

Применяется при определении малых площадей размером $100 \dots 200 \text{ см}^2$. С этой целью изготавливается палетка из органического стекла или кальки. На нее наносится сетка с ячейками со стороной 2 мм . В зависимости от масштаба карты, по которой определяется площадь бассейна, находится цена деления каждой ячейки в квадратных километрах. Общее число ячеек в контуре, умноженное на цену деления, дает площадь контура [5].

1.1.3 Планиметрирование

Рекомендуется при определении площади больших бассейнов. Для этой цели применяется планиметр. Обвод площади производится плавно, без перерыва, с одинаковой скоростью. При планиметрировании углы между рычагами не должны быть менее 30 и более 150 градусов. Отсчет получают из четырех цифр. Первая снимается с циферблата, две следующие – со счетного колеса, последняя – с верньера. Для определения цены деления планиметра выбирается какая-либо правильная фигура (прямоугольник, квадрат, круг), которая обводится планиметром. Цена деления вычисляется по формуле

$$K = A/B, \quad (2)$$

где A – площадь выбранной фигуры в масштабе карты; B – площадь этой же фигуры в единицах планиметра [5].

1.1.4 Графический способ

Площадь водосборного бассейна разбивается на ряд простейших геометрических фигур (треугольников, прямоугольников, квадратов и т.п.), определяется площадь каждой фигуры в соответствующем масштабе карты или плана, и затем эти площади суммируются (рис. 3.1):

$$F = f_1 + f_2 + \dots + f_{12}, \quad (3)$$

где f_1, f_2, \dots, f_{12} – площади простейших геометрических фигур, на которые разбита площадь водосборного бассейна [5].

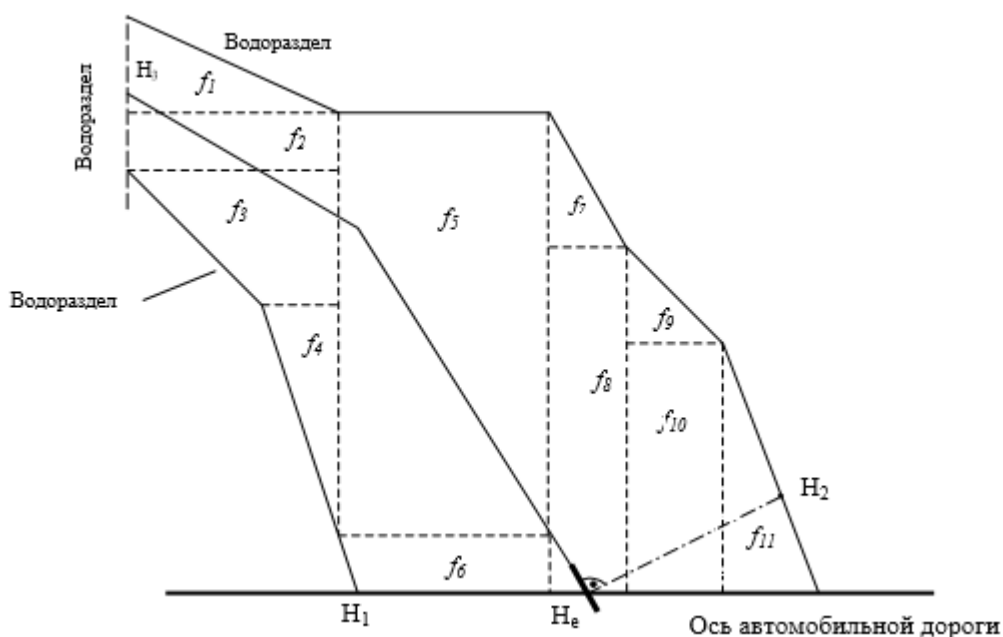


Рисунок 4 - Схема плана водосборного бассейна

1.2 Водохозяйственный участок реки Енисей

Водохозяйственный участок (ВХУ) согласно Водному кодексу России — это часть речного бассейна, имеющая характеристики, позволяющие установить лимиты забора (изъятия) водных ресурсов из водного объекта и другие параметры использования водного объекта (водопользования) [6].

Каждый водохозяйственный участок России имеет свой код 12-значный код, содержащий 9 цифр и 3 разделяющие точки. Первые две цифры кодируют бассейновый округ, третья и четвёртая содержат код бассейна, шестая и седьмая являются опциональным обозначением подбассейна, последние кодируют сам водохозяйственный участок.

В его составе выделено 7 гидрографических единиц подбассейнового уровня, которые, в свою очередь, подразделены на 24 ВХУ (Водохозяйственный участок).

Код и наименование гидрографических единиц и ВХУ (Водохозяйственный участок) приведены ниже.

Подразделы Енисейского бассейнового округа выделяются цифровым кодом 17.

17.01.01 Большой Енисей

Составляет юго-восточную часть бассейна Енисея. Расположен в горах Саяны и ограничивается практически со всех сторон его хребтами.

17.01.02.001 Малый Енисей

Включает бассейн р.Малый Енисей от границы РФ с Монголией до устья. Бассейн расположен в узкой долине, низовья - в Тувинской котловине. Водохозяйственный участок целиком расположен на территории Республики Тыва. Площадь водохозяйственного участка в пределах границ России составляет 40,5 тыс.км².

17.01.03 Енисей между слиянием большого и малого Енисея и впадением Ангары

Охватывают южную часть бассейна Енисея и занимают юго-восточную часть Средней Сибири. С юга территория ограничена хребтами Восточного Саяна. Значительную часть территории занимает Приангарское плато.

17.01.03.001 Енисей от истока до Саяно-Шушенского г/у

Водохозяйственный участок расположен на территории Республик Тыва, Хакасии и Красноярского края. Площадь водохозяйственного участка составляет 64,5 тыс.км².

17.01.03.002 Енисей от Саяно-Шушенского г/у до впадения р.Абакан

Водохозяйственный участок расположен на территории Республики Хакасия и Красноярского края. Площадь водохозяйственного участка составляет 44 тыс.км².

17.01.03.003 Енисей от впадения р. Абакан до Красноярского г/у

Водохозяйственный участок расположен на территории Республики Хакасия, Красноярского края и Иркутской области. Площадь водохозяйственного участка составляет 65 тыс.км².

17.01.03.004 Кан

Водохозяйственный участок 17.01.03.004 включает полностью бассейн р. Кан от истока на северных склонах горного массива Канского Белогорья до устья. На своем пути р.Кан пересекает Канско-Рыбинскую котловину и южные отроги Енисейского кряжа. Водохозяйственный участок расположен на территории Красноярского края и Иркутской области. Площадь водохозяйственного участка составляет 36,9 тыс.км².

17.01.03.005 Енисей от Красноярского г/у до впадения р. Ангара без р. Кан

Водохозяйственный участок целиком расположен на территории Красноярского края. Площадь водохозяйственного участка составляет 30,1 тыс.км².

17.01.03.200 Водные объекты бассейна оз. Убсу-Нур на границе РФ с Монголией

Бассейн оз. Убсу-Нур относится к северной окраине бессточной системы Котловины Больших Озер. Водохозяйственный участок расположен целиком в Республике Тыва. Площадь водохозяйственного участка составляет 19,5 тыс.км² [6].

2 Цифровые модели рельефа

Самые распространенные цифровые данные, которые характеризуют форму земной поверхности, - это растровые (основанные на значениях в ячейках) цифровые модели рельефа (ЦМР или DEM). Эти модели используются в качестве входных данных для количественной характеристики земной поверхности.

ЦМР – это растровое представление непрерывной поверхности, как правило, относящееся к поверхности земли. Точность этих данных определяется, главным образом, разрешением (расстоянием между опорными точками). Другие факторы, влияющие на точность данных, - это их тип (целые числа или числа с плавающей точкой), а также местоположение на земной поверхности опорных точек, использованных при построении исходной ЦМР [7].

Ошибки в ЦМР, как правило, классифицируются либо как локальные понижения, либо как пики. Локальное понижение – это область, окруженная ячейками с более высокими значениями высот; такой участок может рассматриваться как депрессия или яма. Это область внутреннего стока. Некоторые такие участки могут иметь природное происхождение, особенно в нивально-гляциальных или карстовых областях (Mark, 1988), хотя многие локальные понижения представляют собой ошибки ЦМР. Аналогичным образом, острый выступ или пик – это область, окруженная ячейками с более низкими значениями. Вероятность того, что они представляют природные объекты, выше, чем в случае с локальными понижениями, и их наличие в ЦМР меньше влияет на вычисление направления стока.

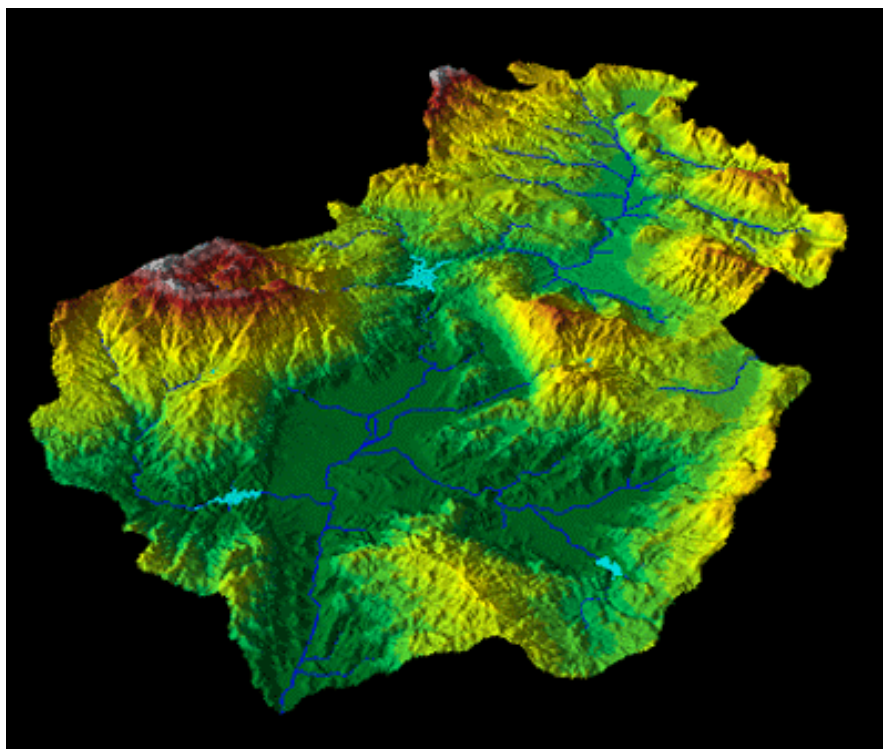


Рисунок 1 – Пример ЦМР

Такие ошибки, в особенности локальные понижения, должны быть удалены до получения любой информации по поверхности. Локальные понижения, которые являются областями внутреннего стока, препятствуют движению воды вниз по склону [8].

2.1 Цифровые модели рельефа для гидрологических расчетов

Цифровые модели рельефа (ЦМР) в настоящее время широко используются специалистами, работающими в самых разных направлениях географии и геоморфологии [9].

Одной из важнейших задач, решаемых с помощью ЦМР, является автоматизированное построение границ водосборов постоянных и временных водотоков. Важность ее решения определяется многообразием научных и прикладных задач, решаемых с помощью бассейнового подхода, роль которого в настоящее время только возрастает. Обусловлено это, в первую очередь, возможностью использования современных информационных

технологий, доступностью цифрового рельефа и базовых гидрометеорологических параметров для всей территории планеты. Все это дает возможность исследовать природные процессы и явления на различных уровнях генерализации с использованием ГИС [9].

ЦМР является основополагающим элементом любой распределенной гидрологической модели, или бассейновой геоинформационной системы, поскольку позволяет определить многие морфометрические и гидрографические характеристики рек и их бассейнов: вектора направления стока, тальвеги и водоразделы, площади водосборов, порядки водотоков, уклоны водотоков. При этом точность автоматизированного определения гидрографических характеристик зависит от характера рельефа, а также от разрешения ЦМР. Наименьшая точность определения границ водосборов по ЦМР характерна для территорий со слаборасчлененным рельефом в связи с тем, что на поверхности с близким к нулю уклоном направление стока и границы водосборов часто определяется неверно, а значительная часть территории вообще не дренируется гидрографической сетью или относится к областям внутреннего стока. Для выполнения гидрологического анализа предъявляются также определенные требования и к разрешению ЦМР [10].

Для автоматизированного оконтуривания бассейнов средних и малых равнинных рек пространственного разрешения и высотной точности свободно распространяемых ЦМР (SRTM-90, GTOPO-30) иногда оказывается недостаточно. В таком случае требуется создание ЦМР на основе оцифровки топографических карт или дорогостоящих данных радарной спутниковой съемки. ЦМР, которая используется при определении гидрографических характеристик рек и их бассейнов, должна быть гидрологически корректной [10].

Понятие гидрологической корректности ЦМР включает два основных положения:

- в ЦМР должны отсутствовать фиктивные точки стока (фиктивные депрессии);

- потоковые линии (тальвеги) на ЦМР должны совпадать с исходными отрезками речной сети.

При построении гидрологически корректной ЦМР должна учитываться не только информация о рельефе, но и данные о речной сети и замкнутых понижениях.

Функции анализа ЦМР и расчета гидрографических характеристик рек и их бассейнов доступны во многих программных средствах ГИС, в данной работе выбрано ПО White Box GAT В программе WhiteBox GAT есть несколько алгоритмов принудительного заполнения, а также алгоритм Breach Depression, который в ряде случаев обеспечивает получение более качественных результатов при моделировании гидрографической сети. Все эти инструменты могут применяться как к ЦМР, построенным на основе топографических карт (с помощью инструмента Топо в растр или триангуляции), так и для общедоступных ЦМР, созданных по данным дистанционного зондирования Земли [9].

2.2 Радарная топографическая съемка SRTM

Shuttle radar topographic mission (SRTM) - радарная топографическая съемка большей части территории земного шара, за исключением самых северных ($>60^\circ$ с.ш.), самых южных широт ($>54^\circ$ ю.ш.), а также океанов, произведенная за 11 дней в феврале 2000 г. с помощью специальной радарной системы. Двумя радиолокационными сенсорами SIR-C и X-SAR, было собрано более 12 терабайт данных (что примерно равно объему информации библиотеки конгресса) [11].

В течение этого времени с помощью метода называемого радарной интерферометрией (radar interferometry) было собранно огромное количество информации о рельефе Земли, ее обработка продолжается и сегодня. Но, определенное количество информации уже доступно пользователям.

В наше время данные есть в общем доступе с максимальным разрешением (30 м, Level-2, 1 arcsecond) [11].

2.3 Радарная топографическая GMTED2010

Модель GMTED2010 (Global Multi-Resolution Terrain Elevation Data 2010). Она была создана на основе 11 источников данных о рельефе Земли, в том числе SRTM для территорий южнее 60° с. ш., а также цифровых данных о высотах, полученных с использованием фотограмметрии при разрешении 100 м для территорий севернее 60° с. ш. Конечные продукты доступны с тремя пространственными разрешениями: 250, 500 и 1000 м. При этом для каждого разрешения существует несколько вариантов моделей GMTED2010, которые различаются алгоритмами обработки исходных данных. Нами была выбрана модель, имеющая разрешение 250 м и полученная с использованием алгоритма обработки breakline emphasis. Этот вариант обработки сохраняет на результирующей модели положение тальвегов временной и постоянной гидросети, построенных по данным исходного разрешения, что особенно полезно при решении задач гидрологического моделирования на больших территориях [12].

2.4 Исходные данные используемые в работе

Были выбраны следующие данные при работе над задачей:

- GMTED2010 (пространственное разрешение 7,5 угл. с / ~ 250 м, 15 угл. с / ~ 500 м, 30 угл. с / ~ 1000 м; пространственное покрытие 84° с. ш.–56° ю. ш. [18]);

- SRTM (пространственное разрешение 1 угл. с / ~ 30 м, 3 угл. с / ~ 90 м; пространственное покрытие 60° с. ш.–56° ю. ш.

- векторный слой Level1 с основными бассейнами Енисея.

2.5 Геоинформационная система Quantum GIS

Quantum GIS (QGIS) — свободная кроссплатформенная геоинформационная система. Работа над QGIS была начата в мае 2002 года, а в июне того же года — создан проект на площадке SourceForge. Целью создания QGIS было сделать использование геоинформационных систем легким и понятным для пользователя, чего создатели QGIS отчасти добились: интерфейс Quantum GIS намного понятнее для неискушенного пользователя, а в некоторых аспектах даже превосходит широко распространенные ГИС [13].

Данная система позволяет просматривать и накладывать друг на друга векторные и растровые данные в различных форматах и проекциях без преобразования во внутренний или общий формат. Поддерживаются следующие основные форматы:

- пространственные таблицы PostgreSQL с использованием PostGIS, векторные форматы, поддерживаемые установленной библиотекой OGR, включая shape-файлы ESRI, MapInfo, SDTS (Spatial Data Transfer Standard) и GML (Geography Markup Language) и др.;
- форматы растров и графики, поддерживаемые библиотекой GDAL (Geospatial Data Abstraction Library), такие, как GeoTIFF, Erdas IMG, ArcInfo ASCII Grid, JPEG, PNG и др. - базы данных Spatialite;
- растровый и векторный форматы GRASS (область/набор данных).

Имеется возможность анализировать векторные пространственные данные в PostgreSQL/PostGIS и других форматах, поддерживаемых OGR, используя модуль fTools, написанный на языке программирования Python. В настоящее время QGIS предоставляет возможность использовать инструменты анализа, выборки, геопроессинга, управления геометрией и базами данных. Также можно использовать интегрированные инструменты

GRASS, которые включают в себя функциональность более чем 300 модулей GRASS [13].

QGIS может использоваться для экспорта данных в map-файл и публикации его в сети Интернет, используя установленный веб-сервер Mapserver. QGIS может использоваться как клиент WMS/WFS и как сервер WMS.

QGIS может быть адаптирован к особым потребностям с помощью расширяемой архитектуры модулей. QGIS предоставляет библиотеки, которые могут использоваться для создания модулей. Можно создавать отдельные приложения, используя языки программирования C++ или Python [13].

2.6 Программное обеспечение WhiteBox GAT

В программе White Box GAT есть несколько алгоритмов принудительного заполнения, а также алгоритм Breach Depression, который в ряде случаев обеспечивает получение более качественных результатов при моделировании гидрографической сети. Все эти инструменты могут применяться как к ЦМР, построенным на основе топографических карт (с помощью инструмента Топо в растр или триангуляции), так и для общедоступных ЦМР, созданных по данным дистанционного зондирования Земли [14].

3 Построение бассейнов

3.1 Основная идея построения бассейнов задействованная в работе

Концепция данной работы заключается в том, что в отличие от предыдущей работы, в которой был использован алгоритм *r.watershed*, в котором построение бассейнов происходит «снизу вверх» [15], в данной работе построение бассейнов выполняется противоположным подходом «сверху вниз», то есть работа начинается с деления России на крупнейшие бассейны.

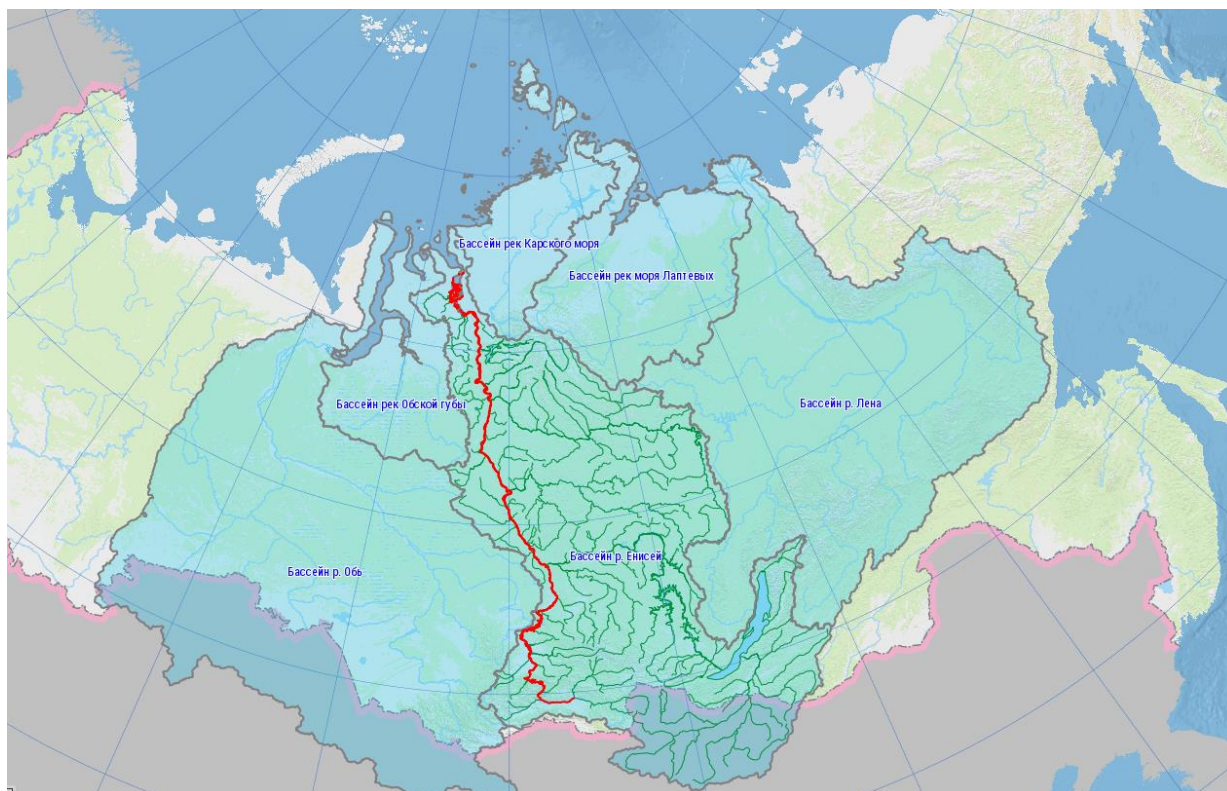


Рисунок 5 – крупнейшие бассейны России

На рисунке видно, что территория России разбита на 6 крупных бассейнов рек: бассейн рек Карского моря, бассейн рек моря Лаптевых, бассейн рек Обской губы, бассейн реки Обь, бассейн реки Лена, ну и конечно бассейн реки Енисея, который взят за объект исследования в данной работе.

На данном этапе территория России была разбита на 6 основных бассейнов рек, с этого начинается данная работа.

3.2 Особенности работы с растровыми данными на северной части реки Енисей

Для работы с северными районами реки Енисей были использованы не привычные растровые данные SRTM с точностью 3 угл. с, а растровые данные GMTED 2010 с точностью 7,5 угл., потому что данные SRTM до 60 градуса с.ш.. Поэтому из всех остальных доступных ресурсов на северную территорию были выбраны GMTED 2010 года. Бассейны сформированные на южную территорию бассейна Енисея более точные, чем бассейны сформированные на северную территорию Енисея исходя из различной точности между данными SRTM и GMTED 2010. Левый берег Енисея как территория более сложная для съемки спутника, так как территория плоская и заболоченная, это также сказывается на рельефе данных и усложняет данную территорию для создания более качественных данных по рельефу.

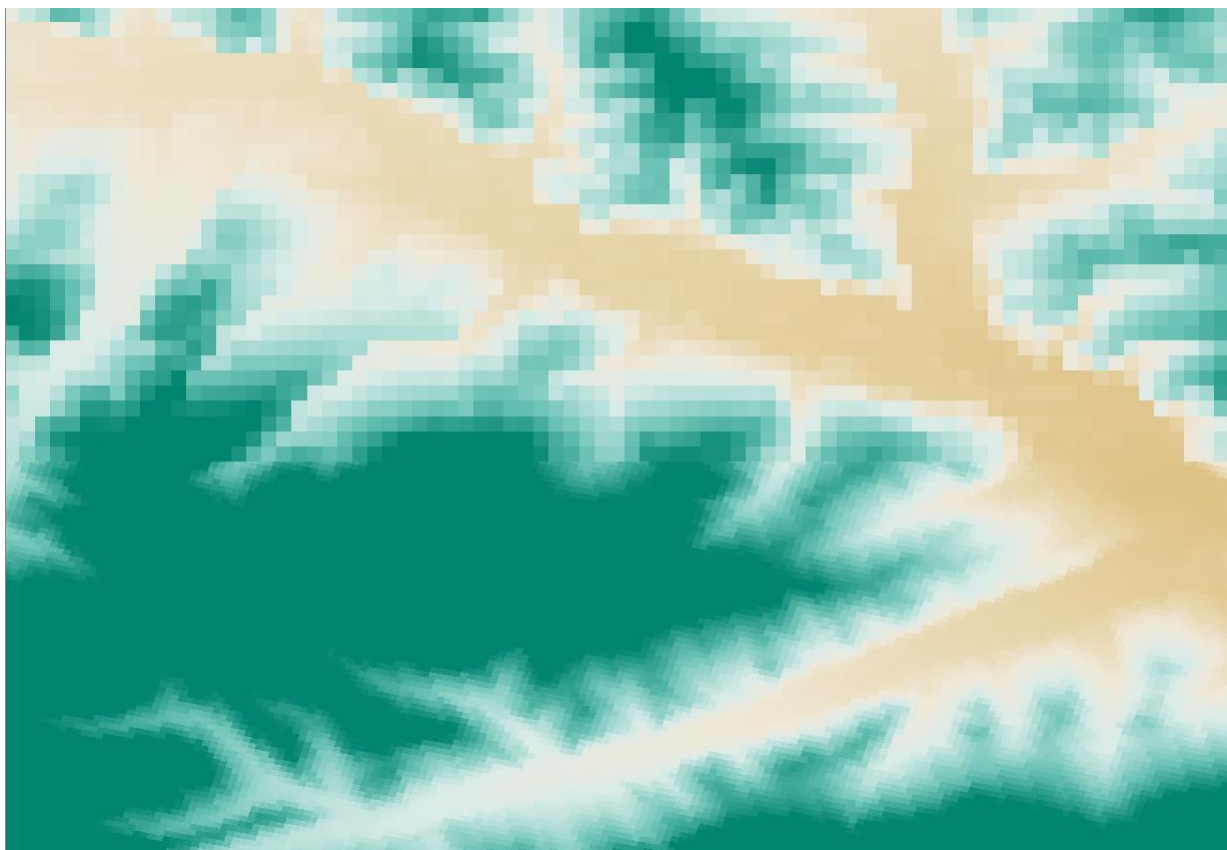


Рисунок 6 – сравнение различия растровых данных

На рисунке видно, что при приближении растров данные сильно различаются в точности. Верхняя часть рисунка - это часть данных GMTED 2010, нижняя часть SRTM. Различие качества данных очень хорошо видно на это рисунке, верхняя часть более «грубая», нижняя более детальная и сглаженная.

Так как данные для нашей задачи различаются по точности и не на всю исследуемую территорию существуют растровые данные SRTM с точностью 3 угл.с, при формировании бассейнов с помощью автоматических алгоритмов ПО White Box GAT получалось много некорректно сформированных бассейнов в основном в северной части Енисея, построенных по данным GMTED 2010, из-за этого в северных районах приходилось много корректировать вручную, исправляя границы бассейнов.



Рисунок 7 – бассейны сформированные по данным GMTED 2010

На примере рисунка 7 видно, что при формировании бассейнов был сформирован один бассейн для рек Бол.Хета, Инхэтэндэ, Варомыяха, Юрахбуни, Токачъя что в дальнейшем корректировалось, так как целью работы было сформировать бассейны для всех именованных рек бассейна Енисея.



Рисунок 8 – бассейны рек с корректировкой в QGIS

На рисунке 8 видно, что бассейны разделены вручную по гидрологической сети бассейнов.

3.2 Технологии построения бассейнов использованные в работе

Ранее задача построения бассейнов была осуществлена с помощью алгоритма *r. watershed* в Программном обеспечении GRASS GIS [15]. Основным принципом работы алгоритма было создание бассейнов «снизу вверх», то есть территория была разбита на полубассейны и далее соединялись в более большие бассейны из маленьких частей. В результате выполнения алгоритма строится карта водосборных бассейнов различного порядка для каждого элемента гидрологической сети на основании ЦМР исследуемой местности. Также при создании бассейнов указывается число параметра *Minimum size of exterior watershed basins*, данный параметр отвечает за

детализацию бассейнов. Чем больше параметр, тем меньше площадь бассейна и соответственно больше количество бассейнов. В работе был взят параметр 10 000.

В данной работе используется обратный метод r.watershed создания бассейнов, бассейны наоборот, из более больших бассейнов формируются в бассейны меньшего порядка.

На первом этапе были взяты укрупненные бассейны рек России с геопортала ИВМ СО РАН.

Следующим этапом была дипломная работа бакалавра, который детализировал на основные бассейны водосборный бассейн реки Енисей используя данные полученные в моей бакалаврской дипломной работе.

На данном этапе были сформированы бассейны с детализацией по слою с названиями 1-го порядка. Работа была выполнена с помощью ПО White Box Gat, которое позволяет благодаря функционалу встроенных алгоритмов выделить бассейны используемой территории.

3. 3 Этапы построения водосборных бассейнов

3.3.1 Подготовка к работе исходных растровых данных

При использовании алгоритмов ПО White box GAT компьютер делает очень много вычислений и сильно перегружается, поэтому если брать изначально готовые ЦМР данные, то данная работа делалась бы очень долго, или из-за того, что на входе были заданы большие объемы данных для расчета программа бы не выполнила вычисления. Для того чтобы использовать алгоритм для создания бассейнов в White Box GAT, исходные данные нужно подготовить. Для этого их нужно разделить на части более мелкого размера. Для этого создаем новый векторный слой по которому обрезаем исходные ЦМР данные. В конечном итоге получилось 17 частей с которыми в дальнейшем происходила работа и дальнейшая подготовка данных.

Рассмотрим поэтапно, как данные обрабатывались.

На первом этап открываем векторный слой бассейнов Level 1, по слою визуально выбираем бассейны, с которыми будем работать, подгружаем один или несколько растровых слоев (в зависимости от того попадает бассейн в один растровый слой или нет, если не попадает, то сначала объединяем растровые слои в один) на эту территорию и создаем векторный слой (на рисунке показано как выполняется данная операция).

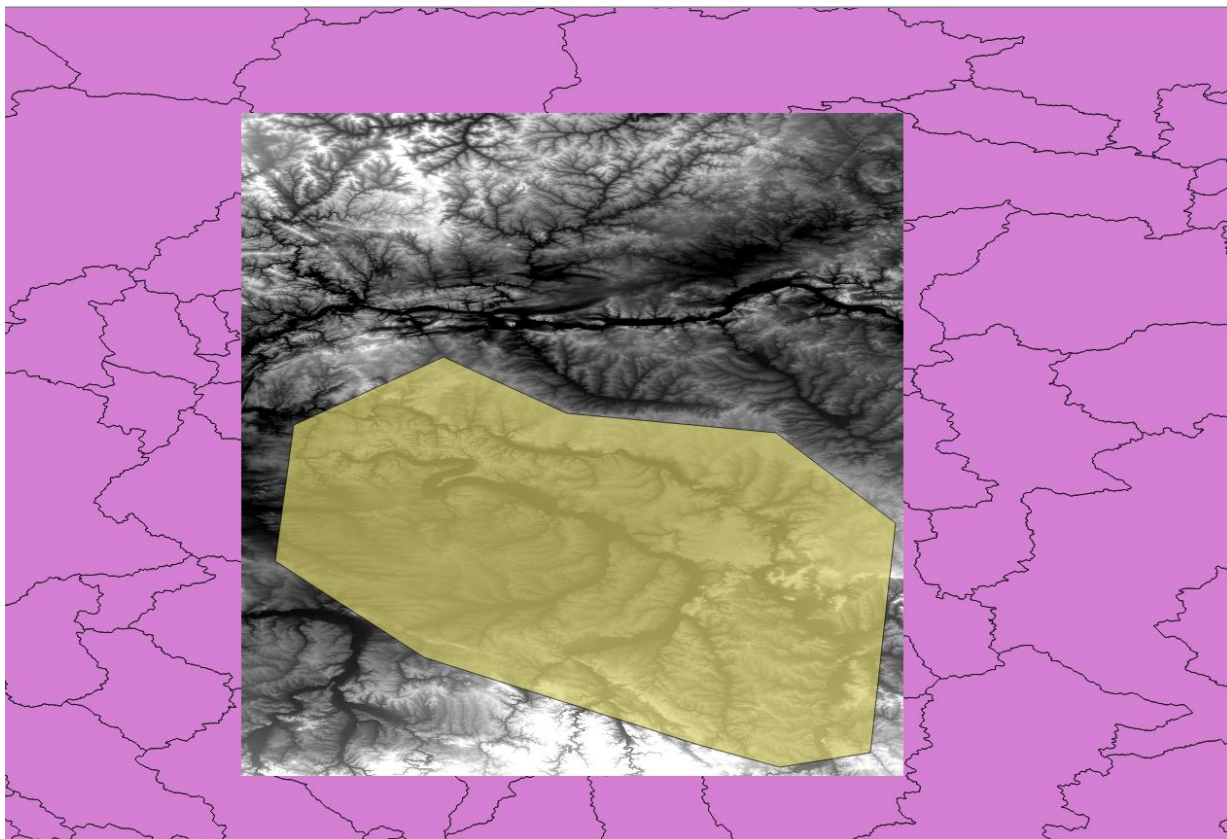


Рисунок 9 – Выбор полигона в данных ЦМР для последующей работы с ним

Далее по созданному слою выполняем операцию «Растр»/ «Извлечение»/ «Обрезка» и обрезаем растр по векторному слою.

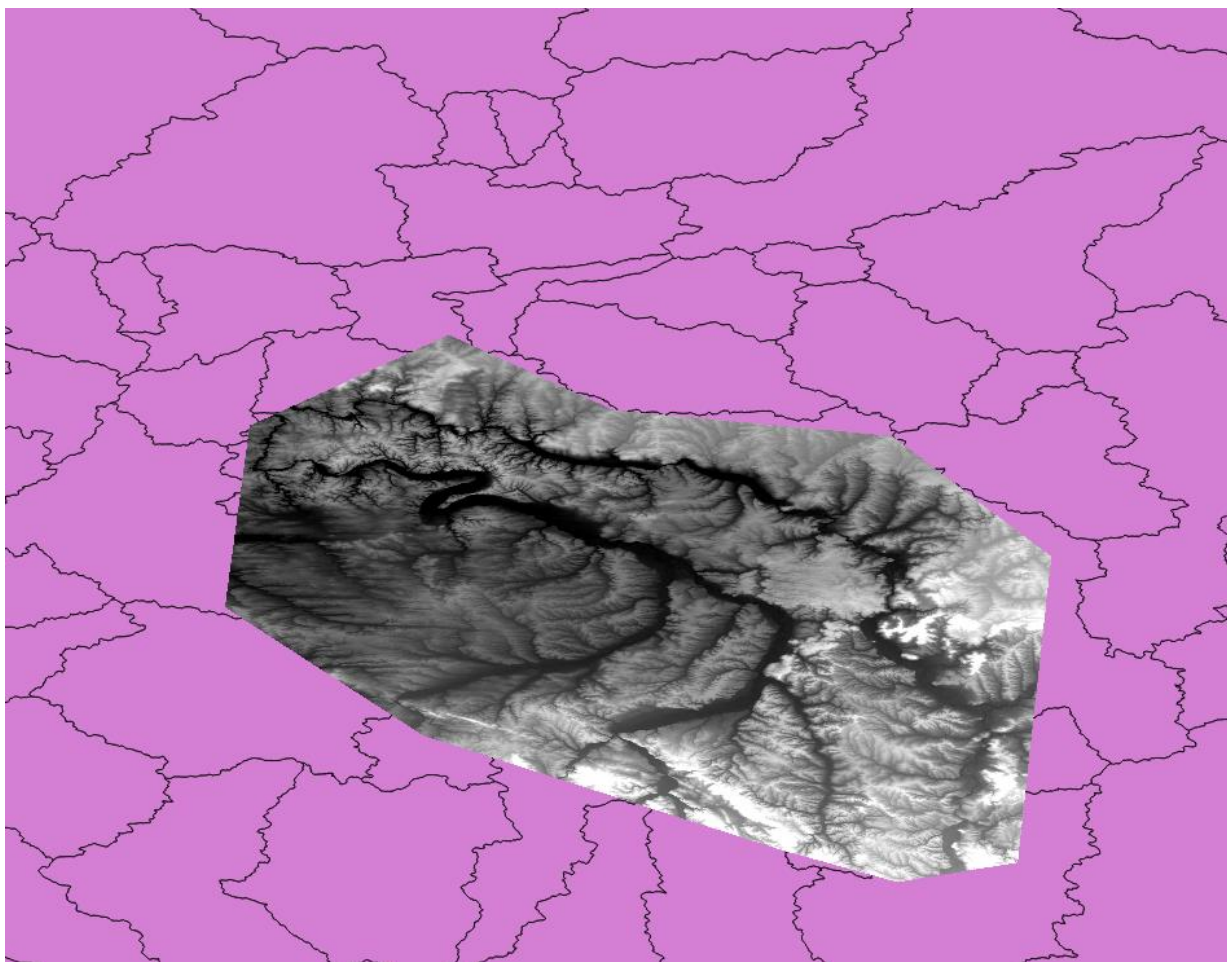


Рисунок 10 – Растр обрезанный по созданному векторному слою

Полученный растр необходимо прероецировать из системы координат градусной 4326 в метровую 3576. Следующим шагом выполняем перепроицирование с помощью операции «Растр»/«Проекции»/«Перепроецирование», так как в программе White Box GAT алгоритмы производят вычисления по данным только в метровой системой координат.

После разбиения и перепроицирования исходных данных ЦМР для дальнейшей работы с алгоритмами `sub.busins`, `extract streams` и `breach depression` получилось 17 файлов с подготовленными данными ЦМР. В среднем одну такую часть компьютер считает 25 минут.

3.3.2 Автоматическое построение водосборных бассейнов с помощью алгоритмов построения бассейнов в Программном Обеспечении White Box GAT

На всех рисунках указанных в этом разделе был продемонстрирован один и тот же участок речной сети для наглядности работы алгоритмов и изменения в слоях после каждого алгоритма.

Алгоритм Breach Depression (Fast) высчитывает слой аккумулятивного стока по исходному растру на нужную территорию. В ходе работы алгоритма создается два слоя:

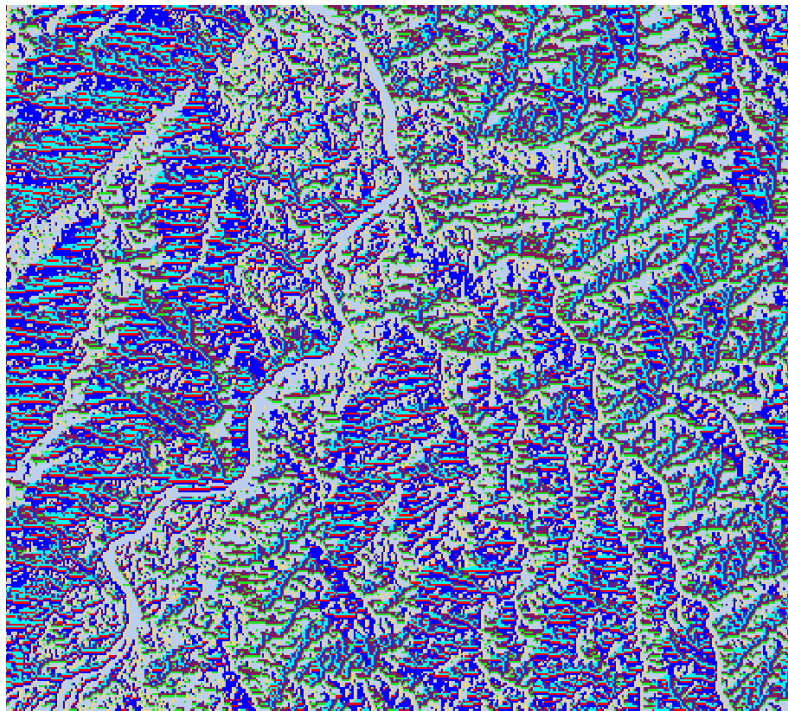


Рисунок 11 – слой flow_pntr

Каждая ячейка растра направления стока несет информацию о направлении движения потока. На его основе рассчитываются линии водотоков и контуры речных бассейнов. Ячейки растра принимают одно из девяти возможных значений.

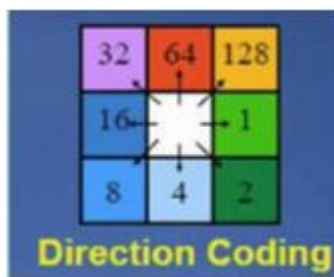


Рисунок 12 – Возможные значения раstra ячеек направления стока

Второй слой `flow_accum` (рисунок 13). Каждый пиксель раstra суммарного стока отображает то количество ячеек, по которым перемещается условный водный поток к данной ячейке. Построенная таким образом растровая модель содержит информацию о водотоках, причем пользователь имеет возможность задать минимальный кумулятивный сток, который для каждой ячейки определяется минимальным количеством ячеек, стекающих в данную. На выходе можно получить сеть водотоков с различной степенью генерализации.

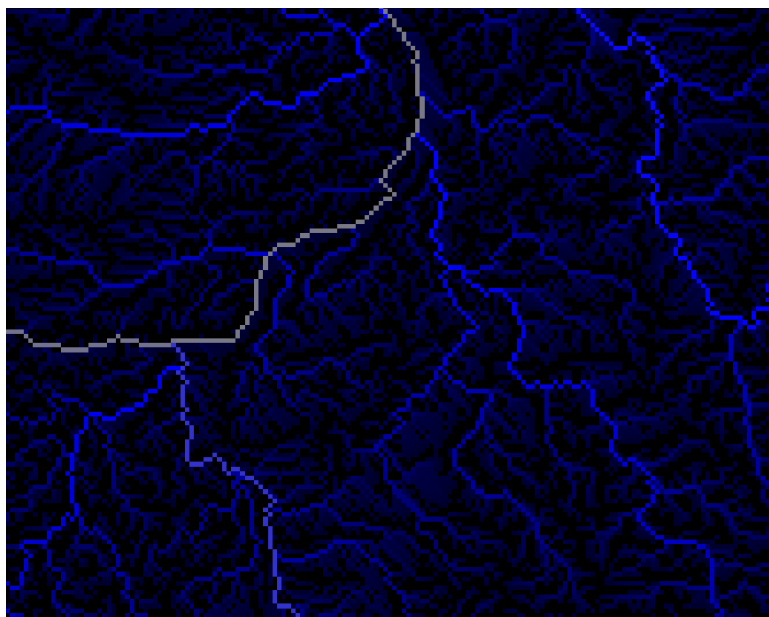


Рисунок 13 – слой `flow_accum`

Алгоритм `Extract Stream` используется для создания слоя бассейнов (высчитывает минимальную площадь для бассейна по заданным значениям масштаба)

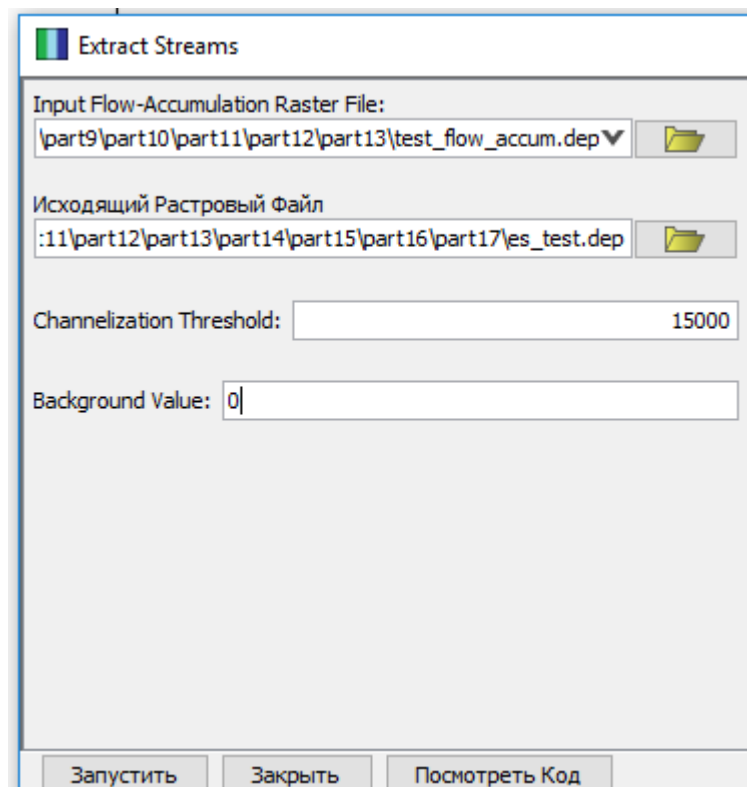


Рисунок 14 – параметры алгоритма extract streams

В начале работы алгоритма слоя в поле Input Flow Accumulation Raster File выбираем слой flow_ассум полученный на предыдущем этапе. В поле Channelization Threshold указываем значение уровня детальности Channelization threshold 15000. Данное значение было получено путем проб создания слоев используя данный алгоритм и меняя значение параметра Channelization.

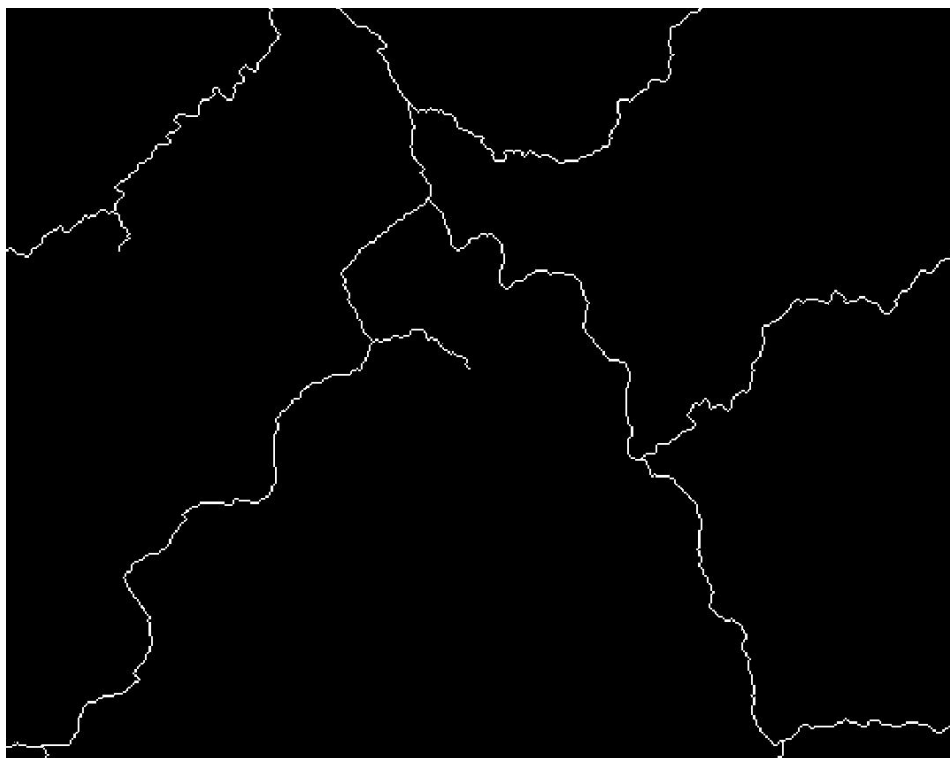


Рисунок 15 – слой extract streams

Также данный слой используем при создании на последнем этапе алгоритма sub.basins.

Алгоритм Sub. Basins является конечным этапом при формировании бассейнов. При выборе слоев по которым будет происходить расчет алгоритма, первым слоем выбираем слой extract stream и слой flow_accum, полученный на первом этапе. Каждый отдельный фрагмент рек вычисленный на этапе работы алгоритма extract streams получает свой бассейн (рисунок 16).

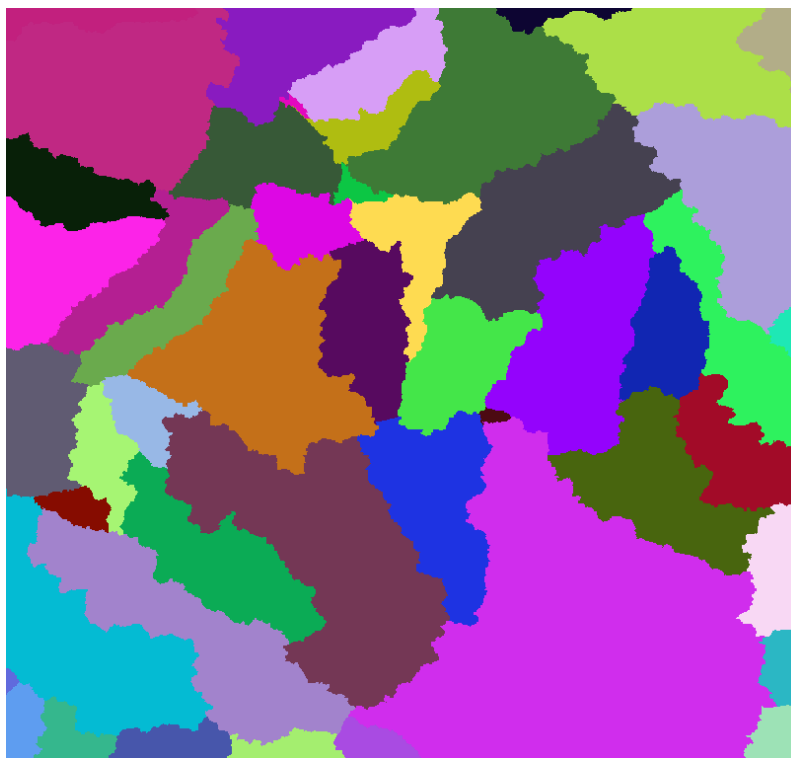


Рисунок 16 – слой sub.basins

Конечным этапом получен растровый слой с водосборными территориями, который экспортируем в формате бинарного растрового файла .flv далее работа продолжается в ПО Quantum GIS.

3.3.3 Формирование и корректировка бассейнов в ПО Quantum GIS

Основной смысл редактирования вручную полученных слоев в результате построения слоев алгоритмами ПО White Box GAT в том, что в ПО White Box GAT строили с большей детальностью бассейны для того, чтобы обеспечить бассейнами все именованные реки миллионного масштаба, то есть формировали бассейны с «запасом» для получения более качественных конечных данных.

На данном этапе с помощью инструментов оцифровки («объединение» выделенных объектов и «разбиение» объектов на части) формировали бассейны в QGIS по векторному слою бассейнов на рисунке 17 выделена голубым цветом речная сеть. Ранее уже на рисунках 7 и 8 был показан пример

формирования бассейнов для северных территорий, так как на данных территориях по данным GDAT 2010 формируются не самые корректные бассейны, которые в большинстве случаев приходилось переделывать. На рисунках 17 и 18 рассмотрим на примере бассейна реки Кан пример корректировки бассейнов для слоя построенного по данным SRTM.

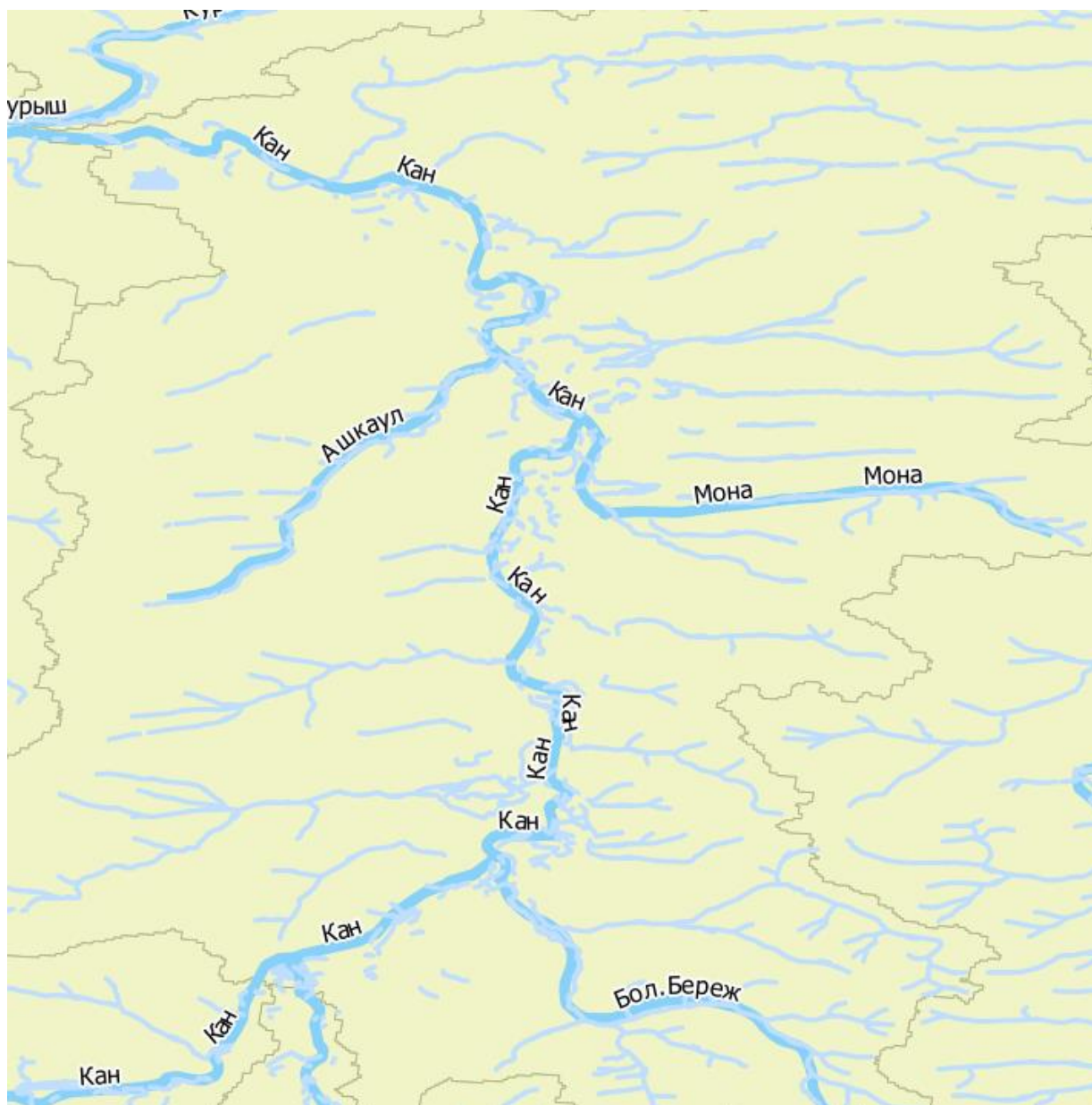


Рисунок 17 – Редактирования бассейна рек Кан

На рисунке 17 видно, что для рек Кан, Бол. Береж, Ашкаул, Мона создан единый бассейн, который необходимо разделить на отдельные бассейны.

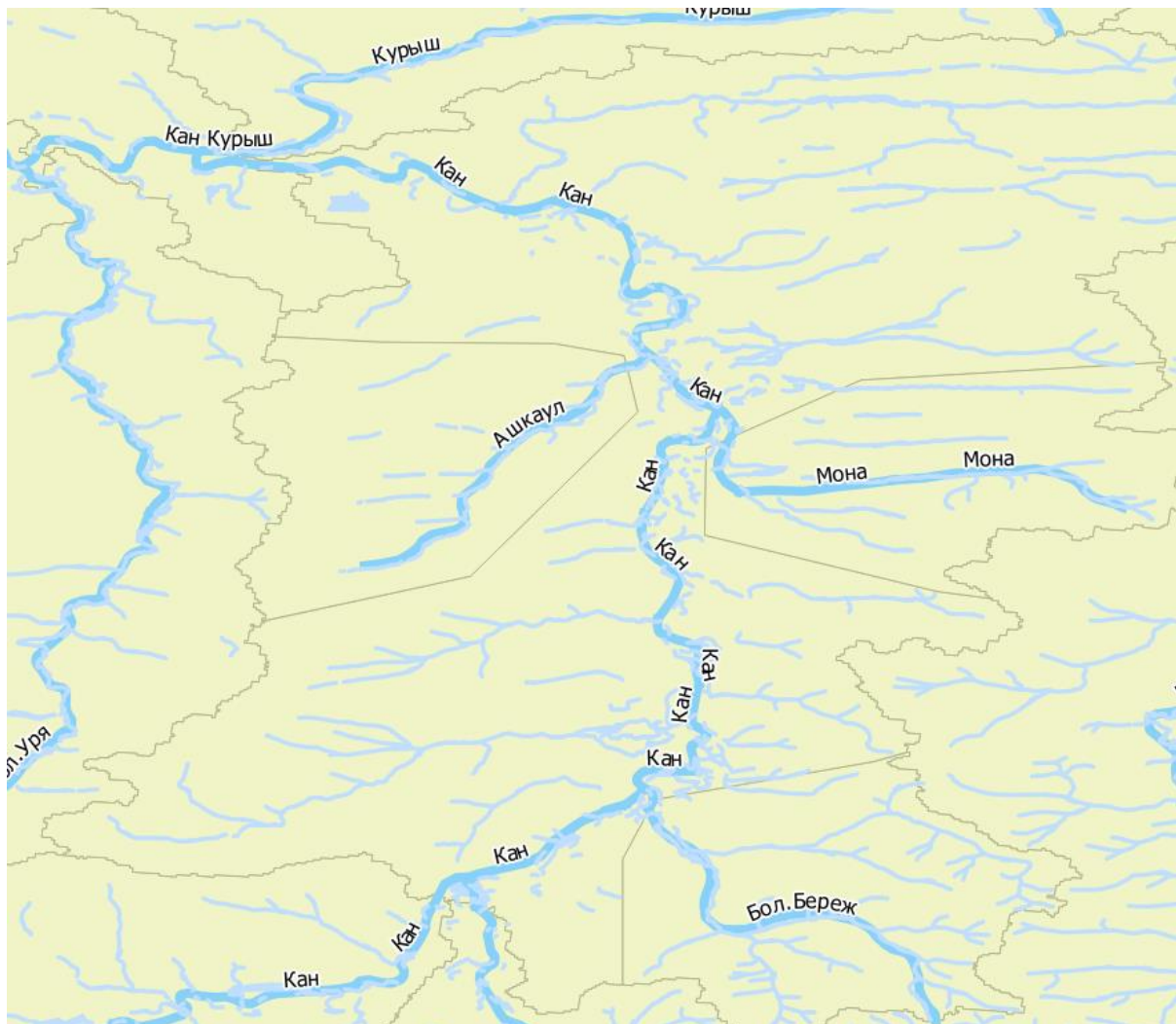


Рисунок 18 – Откорректированные бассейны реки Кан

На рисунке 18 все данные откорректированы по речной сети и приведены к конечному варианту. Также в ходе работы на данном этапе были ситуации, когда бассейны разбивались на более мелкие и необходимо было объединить их в нужный по масштабу бассейн.

3.3.4 Основной результат построения бассейнов

Рассмотрим работу в целом на примере реки Чуна. Ниже приведен фрагмент реки Чуна в векторном слое Level 1.

В ходе обработки данных было сформировано 53 подбассейна реки Чуна. Со средней площадью бассейна 170 км².

4 Анализ дальнейшей работы с полученными данными

Следующим этапом планируется к полученным бассейнам привязать различные экологические и почвенные характеристики для наполнения карты бассейнов информационным контентом и формирование данных для экологического ландшафтного моделирования. Пример подобного рода решения задачи был выполнен коллегами Приволжского университета, которые сделали информационный перечень возможного информационного наполнения бассейнов для Европейской части России включающий рельефные и ландшафтные параметры [16].

Таблица 1 - расшифровка имен полей слоя «бассейны»

Имя	Содержание
ID	идентификатор бассейна
AREA	площадь бассейна (кв.км)
HMEAN	средняя высота в бассейне (м)
HMAXMIN	разброс высот в бассейне (м)
SLOPE	средняя крутизна склонов в бассейне (град.)
ASPECT	средняя экспозиция склонов в бассейне (от «холодных» -1 к «теплым» 1)
UPSTREAM	длины линий тока в бассейне (м)
STI	эрозионный потенциал рельефа в бассейне
TMEAN	средняя годовая температура воздуха (град. С) в бассейне
T1MEAN	средняя температура воздуха в январе (град. С) в бассейне
T7MEAN	средняя температура воздуха в июле (град. С) в бассейне
TMAX	среднее многолетнее максимумов температуры за год (град. С) в бассейне

Имя	Содержание
TMIN	среднее многолетнее минимумов температуры за год (град. С) в бассейне
TAMP	средняя многолетняя амплитуда температуры воздуха за год (град. С) в бассейне
TSD	среднее квадратическое отклонение температуры
TD8	среднее многолетнее число дней с температурой ниже +8 град. в бассейне
TD30	повторяемость (в %) сильных морозов в бассейне
ТАКТ	сумма активных температур (град. С) в бассейне
RMEAN	среднее годовое количество осадков в бассейне (мм)
R58	среднее количество осадков в мае-августе (мм) в бассейне
RCOLD	среднее количество осадков за холодный период года (мм) в бассейне
RWARM	среднее количество осадков за теплый период года (мм) в бассейне
RVC	коэффициент вариации годового количества осадков (%) в бассейне
GTK	среднее значение гидротермического коэффициента в бассейне
GEOL	класс дочетвертичных отложений
PARENT1	преобладающий тип почвообразующих пород
SOIL0	преобладающий тип почвы
LES_PROC	лесистость бассейна (%)
PASH_PROC	распаханность бассейна (%)
LUG_PROC	залуженность бассейна (%)
KUST_PROC	кустарники в бассейне (%)
BOLOTO_PRO	заболоченность бассейна (%)

Имя	Содержание
TYPE_COD	тип ландшафта
LAND_COD	подтип ландшафта
MODEL_MOD_	модуль стока воды (куб.м/(сек*кв.км)
MODEL_LAYE	годовой слой стока воды (мм)
PLT_RANGE	плотность населения (чел./кв.км)
ANTR1	антропогенная нагрузка (балл)

В таблице указаны характеристики, которые использовали в работе коллеги Приволжского института, привязали к бассейнам полученных рек для создания информационной подложки водосборных бассейнов [16].

Полученная карта границ речных бассейнов является основой для создания базы геоданных территории рек Европейской части России. Ими была разработана структура базы геопространственных данных, интегрирующей сведения о температуре, ландшафте рек, среднегодового расхода воды и расхода наносов, модуля стока воды, модуля стока наносов по всем годам наблюдений, площади, средней высоты, уклона, озерности, заболоченности, распаханности. Ввод значений этих показателей проводился по сведениям, содержащихся в томах гидрологических справочников. Ввод других характеристик рельефа (например, экстремальные высоты), а также восполнение отсутствующих (в справочниках) данных проводился по результатам автоматизированной обработки ЦМР. Кроме того, в таблице предусмотрено хранение информации о климатическом поясе, природной (ландшафтной) зоне, типе рельефа, литологическом составе преобладающих на водосборе поверхностных горных пород, типах почв. Использование этой информации позволяет решить ряд задач: установить зависимости формирования и функционирования малых речных систем и их водосборов от ландшафтно - географических условий, выполнить картографирование закономерностей жидкого и твердого стока, оценить степень антропогенной

нагрузки на бассейны и провести интегральную количественную оценку их геоэкологического состояния. Что делает дальнейшее продолжение работы актуальным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные геоинформационные технологии являются мощным инструментом для решения задач, возникающих в науках о земле, в том числе и гидрологии. Возникновение средств создания и анализа цифровых моделей рельефа глобальным образом изменило ситуацию, позволило автоматизировать вычисления и, тем самым, дало новый толчок для развития гидрологических исследований. Возможности современных ГИС позволили значительно увеличить точность и качество представления информации о подстилающей поверхности водосбора, облегчили анализ этой информации, а также автоматизировали многие гидрологические расчеты. Обеспечение точности вычисляемых по цифровым картам параметров потребовало от исследователя жесткого контроля внутренней согласованности цифровых карт, минимизации ошибок на каждом этапе расчетов.

В представленной работе получены следующие основные результаты:

- Подготовлен набор данных по исходным растровым данным SRTM и GDAT 2010 для работы в специализированном ПО White Box путем преобразований в Quantum GIS;
- В автоматическом режиме были сформированы бассейны рек Енисея с помощью трех алгоритмов формирования бассейнов Breach Depression (Fast), Extract Streams, Sub Basins ПО White Box GAT;
- В программе Quantum GIS в ручную были исправлены ошибки полученные при работе алгоритмов формирования бассейнов и скорректированы бассейны;
- Создан набор геопространственных данных водосборных бассейнов реки Енисея с помощью трех алгоритмов построения водосборных бассейнов специализированного ПО White Box GAT.

- Проанализировано дальнейшее развитие работы и наполнение полученного набора геопространственных данных информационным тематическим контентом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Модель паводочного цикла речного бассейна в расчетах и прогнозах наводнений // Тезисы докладов VI всероссийского гидрологического съезда. Санкт-Петербург. 2004. С 77-78. (в соавторстве с Б.И. Гарцманом и М.А. Макагоновой)
2. Гидрология суши. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1973. 34 с
3. Никитенков, А.Н. Речной сток и морфометрические параметры водосборов северной части Кузнецкого Алатау// Известия Томского политехнического университета: Изд-во ТПУ – 2010. – С. 147.
4. Горбачев В.П., Кормильцына Л. В. Определение характеристик водосборного бассейна и расчетного расхода стока: Изд-во ХГТУ- 2003. - С.35.
5. Волченкова Я.В. Пособие по гидравлическим расчетам малых водопропускных сооружений / М.: Транспорт - 1992. – С. 406.
6. Научно-популярная энциклопедия Вода России [Электронный ресурс]: Водохозяйственное районирование. – Режим доступа: <http://water-rf.ru/>
7. ESRI [Электронный ресурс]: ArcGIS Resources. – Режим доступа: <http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.2/index.html#//009z00000005m00000>
8. ГИС Ассоциация [Электронный ресурс]: Подробности о структуре и импорте данных SRTM. – Режим доступа: <http://www.gisa.ru/13712.html>.
9. Шихов А.Н., Черепанова Е.С., Пьянков С.В. Геоинформационные системы. Методы пространственного анализа//Пермь – 2017 – С. 52-53.
10. Мальцев К.А., Ермолаев О.П. Использование цифровых моделей рельефа для автоматизированного построения границ водосборов // Геоморфология. 2014. №1. С. 45-53.
11. Антонов С.А. Перспективы развития картографии: Изд-во СКФУ – 2005. – С.36

12. Danielson J. J., Gesch D. B. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010) // Open-File Report 2011–1073. — Reston: U. S. Geological Survey -2011 - 26 p.

13. Сайт Тамбовский Государственный Технический Университет. Отдел Гис технологий [Электронный ресурс] : Возможности Quantum GIS. – Режим доступа: <https://qgis.org/ru/site/about/>

14. Lindsay J.B., WhiteBox GAT: A case study in geomorphometric analysis // Computers & Geosciences – 2016-75 с

15. Турчанинова Е.С., Якубайлик О.Э. Построение иерархической модели водосборов речной сети // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли//Красноярск – 2017-307-310 с

16. Иванов М.А., Ермолаев О.П. Геоморфометрический анализ бассейновых геосистем Приволжского федерального округа по данным SRTM и Aster GDEM // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса – 2017- 98-109 с